https://doi.org/10.7850/jkso.2021.26.1.049
pISSN : 1226-2978 eISSN : 2671-8820

Note

국립수산과학원 장기 정선 관측 염분 자료의 정확성 평가

박종진*
경북대학교 지구시스템과학부/경북해양과학연구소 교수

Quality Evaluation of Long-Term Shipboard Salinity Data Obtained by NIFS

JONGJIN PARK*
Professor, School of Earth System Sciences/Kyungpook Institute of Oceanography, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

*Corresponding author: jjpark@knu.ac.kr
Editor Kyung-Ae Park
Received 4 February 2021; Revised 6 February 2021; Accepted 8 February 2021

ABSTRACT

국립수산과학원(NIFS)의 정선 관측은 높은 시공간 해상도를 가지며 장기간 동안 같은 정점에서 관측을 수행해오고 있어, 전 세계적으로 유례를 찾아볼 수 없을 만큼 귀중한 자료를 생산하고 있으나, 자료의 신뢰성 문제로 해양 기후 변화 연구에 실제적으로 활용되는 경우가 드물었다. 본 연구에서는 동해 심층 물성이 갖는 작은 자연적 변동성의 특성을 활용함으로써 반세기 이상 축적된 정선 관측 자료에서 나타나는 오차를 정량적으로 평가하여, 해양의 장기 변동성 연구에 기여하는 것을 목적으로 한다. 1°C 등수온면에서 산출한 NIFS 염분 표준 오차는 평균적으로 1961~1980년 자료의 경우 약 0.160 g/kg, 1981년~1994년은 약 0.060 g/kg, 1995~2002년에는 약 0.020 g/kg, 2003년~2014년이 약 0.010 g/kg으로 시기에 따라 크게 달라져온 것으로 분석되었다. 특히 2011년~2014년 사이에 비정상적으로 오차가 증가된 해가 있었으며, 이것은 센서 관리의 미흡으로 염분 편향이 발생하였기 때문으로 파악되었다. 반면, 2012년도에는 안정적인 관측이 수행되어 거의 0.001 g/kg 의 오차를 갖는 매우 정확한 염분 자료가 얻어졌음이 확인되었다. 이 결과를 통해 품질 관리 과정의 체계화와 센서 관리 전문화 시스템을 확충한다면 국립수산과학원 정선 관측이 기후 변화로 인한 해양 변동성 연구에 크게 기여할 수 있을 만큼 충분히 고품질의 자료를 생산할 수 있을 것으로 기대한다. 마지막으로 현 정선 관측의 개선 방향에 대해 몇 가지 제언을 첨부하였다.

The repeated shipboard measurements that have been conducted by the National Institute of Fisheries Science (NIFS) for more than a half century, provide the valuable long-term hydrographic data with high spatial-temporal resolution. However, this unprecedent dataset has been rarely used for oceanic climate sciences because of its reliability issue. In this study, temporal variability of salinity error in the NIFS data was quantified by means of extremely small variability of salinity in the deep layer of the south-western East Sea, in order to contribute to studies on long-term variability of the East Sea. The NIFS salinity errors estimated on the isothermal surfaces of 1°C have a remarkable temporal variation, such as ~0.160 g/kg in the year of 1961~1980, ~0.060 g/kg in 1981~1994, ~0.020 g/kg in 1995~2002, and ~0.010 g/kg in 2003~2014 on average, which basically represent bias error. In the recent years, even though the quality of salinity has been improved, there still remain relatively large bias errors in salinity data presumably due to failure of salinity sensor managements, especially in 2011, 2013, and 2014. On the contrary, the salinity in the year of 2012 was very accurate and stable, whose error was estimated as about 0.001 g/kg comparable to the salinity sensor accuracy. Thus, as long as developing proper data quality control procedures and sensor management systems, I expect that the NIFS shipboard hydrographic data could have good enough quality to support various studies on ocean response to climate variabilities. Additionally, a few points to improve the current NIFS shipboard measurements were suggested in the discussion section.

Keywords: NIFS long-term hydrographic observation, ARGO float, Salinity error, Ocean climate

Copyright ⓒ 2021 Journal of the Korean Society of Oceanography.

1. 서 론

동해는 대양에 비해 공간적 규모면에서는 매우 작은 바다이지만, 깊은 수심과 뚜렷한 온대역 및 냉수역을 가지고 있으며 대양에서 일어나는 해양 수직 순환을 자체적으로 가지고 있는 바다이다. 지구온난화로 인한 대양의 수직 순환 변동에 대한 이해는 앞으로의 기후변화 향방을 이해하는데 중요한 열쇠 중 하나이지만, 대양 수직 순환의 시간 규모가 1000년 정도로 길지만, 비교적 정확한 해양 실측 자료가 축적된 기간은 100년 정도로 기후변화에 따른 해양의 변동을 이해하기에는 현존하는 자료의 시간 길이가 충분하지 않다. 하지만, 동해의 경우 수직 순환의 시간 규모가 30년 정도에 불과하여(Min and Warner, 2005). 1900년대 들어와서 급격하게 증가한 기온 등 대기 환경 변화에 대해 해양이 어떻게 반응하는지를 실측자료로 볼 수 있는 훌륭한 시험장으로 평가할 수 있다(Kim *et al*., 2004).

기후변화와 연관된 해양의 반응을 이해하기 위해서 반드시 필요한 것은 장기간 축적된 해양 실측자료이다. 한국해양자료센터는 1927년부터 현재까지 정선 관측 자료를 수집하여 보관하고 있는데, 이는 거의 100년에 달하는 장기간 축적된 해양 자료로 해양 과학 역사상 매우 소중하며 세계적으로도 유례가 드문 귀중한 자료이다. 이 정선 관측은 일제 강점기에 시작되어 한국전쟁 시기를 제외하고는 1950년대 말까지 관측이 유지되어 왔었다. 1960년대 초반 과거 정점 체계를 재편하여 현재까지 이 정점 관측 체계 하에서 정선관측이 수행되고 있다. 국립수산과학원(National Institute of Fisheries Science, NIFS)에서는 해당 정점에서 매년 6차례 격월 간격으로 한반도 주변해역의 해양 물성관측 및 환경관측을 수행해오고 있으며, 이 관측은 전 세계적으로 수행되고 있는 선박관측과 비교했을 때 비교적 높은 시공간 해상도(평균 정점간 거리가 약 20 km, 평균 시간 간격 2개월)를 가지며 오랜 시간동안 거의 유사한 위치에서 관측을 수행하였다. 특히 급격한 기후변화의 영향으로 한반도 주변해역 역시 크게 변화하고 있으며, 이러한 변화가 다양한 해양현상 및 환경에 미치는 영향을 연구하는 것이 시급한 시점이므로, NIFS에서 장기간 수집해 온 해양 실측 자료가 다시금 중요하게 조명되고 있다.

그러나, 학계에서는 NIFS 정선 관측 자료의 품질을 신뢰하지 않아 장기간 자료가 얻어졌음에도 불구하고 동해 장기 물성 변동 연구에 거의 활용하지 못하고 있는 실정이다(e.g. Kang *et al*., 2005). 기후변화에 직접적으로 영향을 받는 물성 변동은 수직 순환의 결과물이며, 동해의 수직순환이 수십년간 어떻게 변화해 왔는지를 이해하기 위해서는 정확한 물성자료가 필수적이다. 동해 물성의 수직구조는 대양의 수직구조보다 약 5~10배 작기 때문에(Park and Kim, 2007) 기후변화에 따른 수직순환 변동을 이해하기 위해서는 특히 더 높은 정확도의 물성자료가 요구된다. 하지만, 이러한 요구를 충족할 수 있을 정도로 체계화된 품질 관리 과정이 마련되어 있지 않고, 비정상적인 자료가 많이 포함되어 있는 상태로 사용자에게 제공되고 있기 때문에 전체 자료에 대한 신뢰도 저하로 이어져 왔다. 게다가, 세계적으로도 선박 관측 자료는 과거에서 현재까지 관측하는 방식 및 장비가 변해왔으며 이에 따라 관측 자료 정확도 역시 과거보다 현재로 올수록 급격하게 높아져왔다. 즉, 관측 오차가 시간에 따라 변해왔기 때문에 관측 자료의 정상성(stationarity)를 담보하기 어려우므로, 시간에 따른 물성의 변동성을 현재 가용한 자료를 있는 그대로 분석하는데 문제가 있을 수 밖에 없다(시계열 분석에서 기본 가정은 자료의 정상성이다). 이러한 문제를 최소화하기 위해서는 축적된 장기 해양 자료의 관측 오차를 정량적으로 평가하여, 시간에 따라 오차가 어떻게 변해왔는지를 알아내는 것이 우선적으로 연구되어야 함에도 불구하고 현재까지 NIFS 정선 관측 자료의 오차를 정량화하기 위한 연구가 매우 미흡하였다.

이에 본 연구에서는 반세기 이상 축적된 정선 관측 자료 중 염분 자료의 시간에 따른 오차 변동을 정량적으로 분석함으로써 기후변화에 따른 동해 물성의 장기 변동과 나아가 수직 순환 변동을 이해하는데 있어 정선 관측 자료의 활용도를 높이는데 기여하고자 하며, 앞으로 정선 관측 자료의 품질을 유지하고 관리하기 위해 고려해야 할 부분을 논의하고자 한다.

2. 국립수산과학원 정선 관측 자료 및 ARGO 플로트 자료

염분의 품질을 평가하기 위한 NIFS 정선 관측 자료는 1961년부터 2014년까지 기간 동안 얻어진 것을 활용하였으며, NIFS 정선 관측 자료의 품질 평가를 위한 기준 자료로써 2000년부터 2015년까지의 ARGO 플로트 자료를 활용하였다(실제 ARGO 플로트 관측 자료는 1999년부터 존재하지만, 동해 남서부 해역에서 얻어진 자료가 적기 때문에 본 분석에는 2000년부터 얻어진 자료를 활용한다). Fig. 1은 NIFS 정선 관측 자료의 분포와 유사한 지역에서의 ARGO 플로트 자료 시공간 분포를 나타낸다. NIFS 정선 관측 자료는 해당 해역에서 매년 약 400개의 수온/염분 프로파일 자료가 얻어졌는데, 분석에는 수심 200 m 보다 얕은 연안 정점 자료는 제거하고, 200 m 보다 깊은 해역에 있는 자료 중 해당 기간에 있는 자료 총 11,586개의 수온/염분 프로파일 자료를 활용하였다. ARGO 플로트 자료는 NIFS 정선 관측 해역에서 관측된 자료만 선택하여 총 6,822개의 프로파일 자료를 활용하였다.

NIFS의 수온/염분 자료는 표준 수심에서만 제공되므로 수직 해상도가 매우 낮으며 최대 수심은 500 m로 이보다 깊은 심해 자료가 제공되지 않는다. 염분 자료의 정확도를 분석하기 위해서는 자연적인 변동성이 작은 심해 자료를 활용하는 것이 보다 정확한 오차 값을 산출하는데 있어서 중요하다. 그러나, 현재로는 해당 수심까지 얻어진 자료를 최대한 활용하여 NIFS 염분 자료의 오차가 시간적으로 변동하는 양상을 추정할 수 밖에 없다.

ARGO 플로트에서 얻어진 수온 및 염분 자료는 800 m 수심까지 관측되어 비교적 정확한 품질 관리가 가능하였고, 까다로운 국제적 품질 개선 과정(quality control process)에 맞춰 품질 관리가 수행되었다. ARGO 플로트와 같이 무인으로 오랜 기

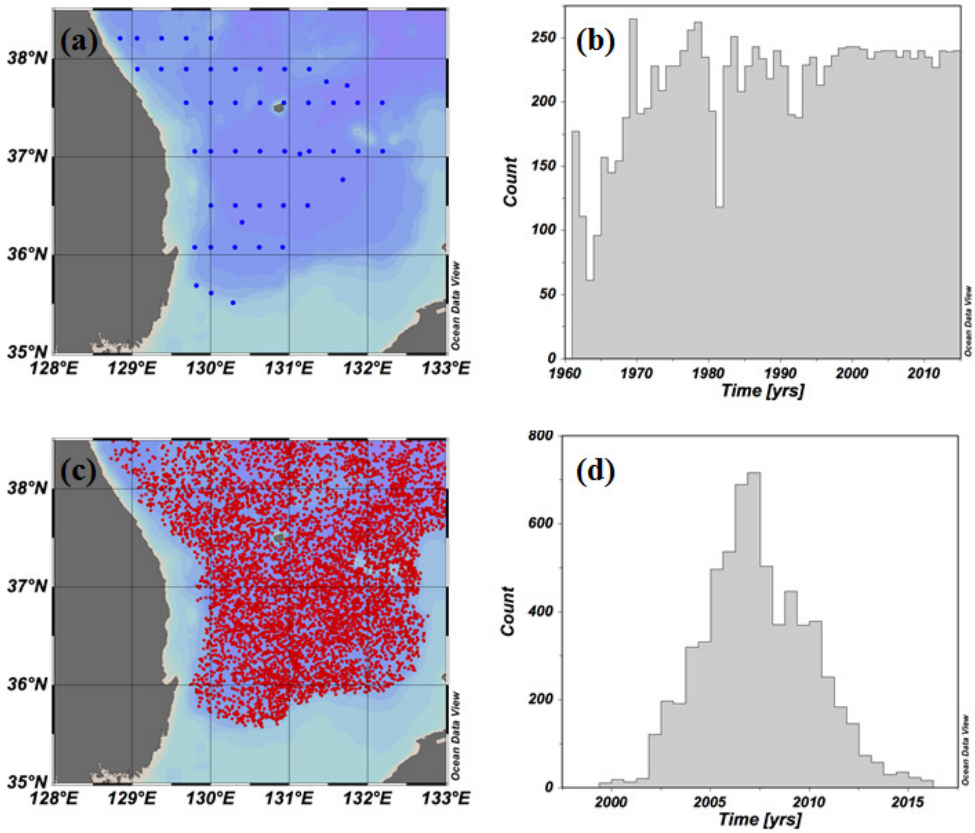

Fig. 1. (a) NIFS hydrographic station map from 1961 to 2014, (b) the number of NIFS profile data in years, (c) the ARGO float data station map from 2000 to 2015, and (d) the number of ARGO profile data in years.

간 자동 관측하는 경우에는 생물체 흡착(biofouling) 등으로 관측 값에 편향이 발생하거나, 부유 물질과의 충돌 등으로 인해 센서에 일시적 또는 영구적 오류가 발생할 수 있기 때문에, 선상 관측 자료보다 정밀한 자료 품질 평가 및 보정 과정이 필수적이다. 특히 동해는 수온과 염분의 수직 변동 폭이 대양에 비해 10배 정도 작지만, 수년에서 수십년 주기의 변동이 심해에서 뚜렷하게 존재하므로 정밀한 선상관측 자료를 기준으로 하여, 동해 환경에 적합한 ARGO 플로트 자료품질 개선과정이 요구된다(Park and Kim, 2007). 따라서, 2016년 현재 기상청/기상과학원에서 투하한 ARGO 플로트와 한국해양과학기술원에서 투하한 ARGO 플로트 자료에 대하여 동해 환경에 최적화된 국제 ARGO 플로트 품질 관리 방법에 따라 지연모드 품질 관리를 수행하였으며, 편향 보정을 위해서 정확성이 검증된 1993년부터 2004년까지의 CREAMS (Circulation Research of East-Asian Marginal Seas) 프로그램 CTD 선박관측 자료 및 Office of Naval Research 사업으로 Lynne Talley 교수팀이 동해에서 수집한 1999년 선박 관측 자료(Talley *et al*., 2004)만을 염분 기준 자료로 활용하여 OW 방법으로 편향 보정한 뒤 (Owens and Wong, 2009) 고품질 자료를 산출하였다.

3. 정선 관측 염분 자료의 정확도 평가 방법

실측 자료의 정확도를 평가하기 위해서는 같은 위치와 같은 시간에 독립적으로 얻어진 다른 자료와 비교하는 방법이 직접적이고 정확하지만, 과거 NIFS 정선 관측 자료와 비슷한 시공간 위치에서 얻어진 비교 가능한 자료가 없기 때문에 이러한 방법은 활용할 수가 없다. 따라서 현재의 자료를 바탕으로 과거의 자료를 평가하기 위해 심해에서 시공간적 변동이 매우 작은 동해의 독특한 물성 구조를 이용하는 방법을 활용한다.

정선 관측 자료의 염분 정확도 평가는 다음과 같은 2가지 방법으로 진행하였다. 첫 번째 방법은 공간적으로 유사한 해역에서 얻어졌으며 염분 자료의 오차를 알고 있는 ARGO 자료로부터 염분 값의 자연적 변동성(분산)을 추정하고, 그 변동성이 1960년대부터 현재까지 수십년 동안 변하지 않는다는 정상성(stationarity) 가정을 적용함으로써, NIFS 염분 자료의 오차를 추정하는 방법이다. 2000년부터 2015년까지 16년 동안 얻어진 ARGO 자료를 활용하여 등수온면에서 염분 변동의 통계적 특성을 살펴보고, 이러한 통계적 특성이 수십년 동안 변하지 않는다는 가정을 바탕으로 NIFS 정선 관측 자료 품질을 평가한다. 평균적인 관점에서 염분이 수년 이상의 시간 규모로 변화한다고 하더라도, 통계적 특성인 분산이 시간에 따라 변화하지 않는다면 본 방법이 유효하다고 할 수 있다.

ARGO 플로트 관측 자료를 활용하여 염분 변동의 통계적 특성을 살펴보기 위해서 동해에서 NIFS 정선 관측 자료가 주로 얻어진 영역을 기준으로 북위 35.5도~38.5도, 동경 128도~133도 사이에 해당하는 자료만을 분석에 활용하였다. 분석에 활용하는 염분 값은 등압면 상의 염분이 아니라 등수온(potential temperature) 1°C 상에서 염분을 Akima spline 내삽법을 이용하여 산출하였다(Akima, 1972).

등압력면에서의 염분은 공간적인 변동이 심하기 때문에 염분의 정확성 평가를 위해 수심이나 압력을 분석 기준으로 사용할 수가 없다. 그 이유는 수중에서는 소용돌이 및 내부파 등으로 밀도면이 수직적으로 끊임없이 진동하고 있기 때문에 등압력면에서는 약간의 공간 및 시간 차이에 의해서 염분 값이 크게 변화할 수 있다. 등압력면에서 염분 변동을 본다면 자연적인 변동성이 매우 커질 수 있기 때문에 오차 계산에 있어 불확실성이 높아진다. 마찬가지로 높은 수온 즉 얕은 수심에서 얻어진 염분 값을 기준으로 오차를 평가하는 경우에도 자연적인 변동성이 커짐으로 인한 불확실성이 증가하므로 가능한 한 자연적인 변동성이 작은 심층 즉 낮은 수온에서 얻어진 염분 값을 활용하는 것이 필요하다. 자연적인 변동성이 커지는 경우, 추정하는 오차 값에 불확실성이 증가하는 이유는 이러한 계산 위해 설정했던 가정이 맞지 않게 될 가능성이 높아지기 때문이다. 먼저 자연적인 변동성이 커지면 시간에 따라 이러한 변동성이 동일하다는 정상성 가정에 오류가 커질 수 있으며, 또한 해양 물

리적 현상의 시공간적 배치에 따라 자연적인 변동성의 확률분포가 가우시안 확률 분포를 따르지 못할 가능성도 커질 수 있기 때문에, 추정한 오차 값의 불확실성이 증가하거나 과대 평가될 수 있다. 수온을 기준으로 할 경우에는 잘 변화하지 않는 수괴의 물성 입장에서 염분 자료를 볼 수 있기 때문에 자연적 변동성이 작아 자료의 품질을 평가하기 용이하다. 특별히 1°C 등수온면을 기준으로 설정한 이유는 대부분의 NIFS 정선 관측 자료에서 나타날 수 있는 가장 낮은 수온 기준이기 때문이다. 수온이 낮을수록 염분의 자연변동성이 작아지기 때문에 NIFS 염분 오차 평가의 정확성을 높일 수 있다. NIFS는 수심 500 m까지밖에 관측하지 않기 때문에 1°C 보다 더 낮은 등수온면은 종종 나타나지 않는 경우가 있어, 대부분의 NIFS 정선 관측 자료에서 나타나는 가장 낮은 수온인 1°C를 기준면으로 결정하였다.

ARGO 플로트 자료로부터 얻어진 1°C 등수온면에서의 염분 변동(σ_{ARGO})은 다음과 같이 자연적인 변동성(σ_{nature})과 자료의 오차(e_{ARGO})로 결정된다. 만약 관측 기기가 ARGO 플로트 자료 오차만큼의 표준편차를 가지는 가우시안 오차 확률 분포를 가진다고 가정하고, 이 ARGO 플로트로부터 가우시안 확률 분포를 갖는 자연적인 변동성을 측정했다고 할 때, 얻어지는 오차 확률 분포의 분산은 다음과 같이 계산될 수 있다(Lichten, 1999).

$$\sigma_{ARGO}^{2} = \sigma_{nature}^{2} + e_{ARGO}^{2} \tag{1}$$

ARGO 염분 자료의 오차는 앞서 Park and Kim(2007)에서 0.003 g/kg으로 제시되었으므로 이 값을 활용하면, 식 (1)에 의해 자연적인 변동성을 추출할 수 있다. 이렇게 얻어진 자연적인 변동성이 시간에 따라 동일하다는 정상성 가정을 적용한다면, 마찬가지로 NIFS 정선 관측 자료로부터 얻어진 염분 변동(σ_{NIFS}) 또한 자연적인 변동성과 NIFS 염분 자료의 오차로 구성되므로 결국 NIFS 염분 자료(e_{NIFS})의 오차는 다음 식 (2)와 같이 계산될 수 있다.

$$e_{NIFS} = \sqrt{(\sigma_{NIFS}^{2} - \sigma_{ARGO}^{2} + e_{ARGO}^{2})} \tag{2}$$

자연적 변동성 즉 분산이 시간에 따라 동일하다는 가정은 항상 타당하다고 보기는 어려우나, 자연과학에서 얻어진 자료를 시계열 분석할 때는 항상 이 가정을 바탕에 두고 있다. 또한 실제 자연적 변동성과 ARGO 플로트 염분 자료의 오차는 모두 소수점 3자리로서 식 (2)의 방법으로 얻은 NIFS 염분 자료의 오차값은 적어도 소수점 3자리에서 정확하다고 볼 수 있다.

두 번째 방법은 같이 유사한 시기 비슷한 지역에서 얻어진 ARGO 자료와 NIFS 정선 관측 자료를 직접 비교함으로써 NIFS 정선 관측 자료의 정확도를 측정한다. 이 방법은 2000년부터 2015년까지 ARGO 자료가 존재하는 시점에만 가능하기 때문에, 첫 번째 방법으로 얻은 NIFS 염분 자료 오차가 타당한지 검증하는 용도로 활용된다. 염분 자료의 비교는 첫 번째 방법과 유사하게 1°C 등수온면에서 진행하며, NIFS 정선 관측 자료와 ARGO 자료 비교를 위해서 10일, 20 km 시공간 윈도우를 적용하여 서로 짝지어진 샘플을 찾는다. 서로 유사한 시간대와 해역대에서 얻어진 자료를 비교하기 위한 시공간 윈도우는 Park and Kim(2013)과 Park and Park(2015)에서 분석한 결과를 바탕으로 적용하였다.

이러한 염분 품질의 평가 방법은 3가지 한계점을 가지고 있다. 먼저 해당 방법은 앞서 이야기한 바와 같이 동해 심층 염분의 자연 변동성이 상대적으로 작아야 자료 정확도 산출이 정확할 수 있다. 자료 개수가 무한히 많은 것이 아니므로 여기서 산출된 자연 변동성이 작아야 산출한 분산 값 자체의 오차가 작을 수 있기 때문이다. 따라서 자연 변동성이 작은 심층 자료에만 적용된다는 한계점이 있다. 그리고, 염분 자료의 특성상 가장 크고 심각한 오차는 주로 편향 오차에서 나타나기 때문에, 변동성이 작은 심층 자료를 가지고 분석한다고 했을 때 이 중요한 편향 오차를 평가할 수 있어 의미가 있다. 편향 오차가 아닌 오차의 경우에는 일반적으로 센서 글리치(glitch)나 채수 샘플 처리 시 일부 문제가 생기는 것으로 이러한 자료는 스파이크 시험

(Spike test) 또는 밀도 역전 시험(Density inversion test) 등으로 오차를 판단하여 제거할 수 있어, 수층 내에서 일부 샘플에서 발생하는 뚜렷한 오류 값에는 대응할 수 있다. 그러나, 본 연구에서 산출하는 오차 수준 평가는 주로 편향 오차에 대한 정량적 값이며 이 부분에 대해서는 토의에서 좀 더 자세히 다루고자 한다.

두 번째 한계점은 매 연도별로 염분 값의 분산을 구하여 연도별 염분 값의 오차를 산출하는데, 만일 특정 년도에 얻어진 모든 염분 값이 일정하게 편향되어 있다면 그 평균적 편향만큼의 오차를 산출할 수는 없다는 것이다. 사실상 이러한 경우가 현실적으로 얼마나 가능한 지는 판단할 수 없으나, 예를 들어 정확하게 매년 NIFS 관측이 시작되는 2월 전에 센서에 대한 하드웨어 보정 과정을 수행했고, 우연하게 특정 해에 관측 당시부터 일정 크기의 편향이 발생되어 일년 내내 유지되었다고 가정하면, 이런 편향이 오차에 포함되지 못하여 해당 방법으로 산출한 오차는 과소 평가될 가능성이 있다. 이것은 채수 자료에도 마찬가지이다. 현실적으로 이러한 문제가 존재할 가능성은 매우 낮아 보이지만 완벽하게 배재할 수는 없으며, 만약 존재한다면 본 연구에서 산출된 오차는 그 편향만큼 과소 평가되었을 수 있다.

마지막 한계점은 수온 자료가 염분에 비해 매우 정확하다는 가정이 필요하다는 것이다. 수온 자료가 염분 자료보다 훨씬 더 큰 오차를 가진다면 현재 계산 방법으로 얻어진 염분 오차는 수온에 의해 발생했을 가능성이 더 크기 때문이다. 그러나, 일반적으로 수온은 염분보다 오차가 훨씬 작으며 현존하는 해양 자료 중 자연적 변동 범위에 비해 오차 수준이 가장 낮은 변수이다. 사실상 수온의 오차 수준이 가장 낮다는 점이 수온을 기준으로 염분을 평가하는 방법을 채택한 하나의 이유이기도 하다. 수온 자료의 오차는 산출한 염분의 자연변동성을 작게 만들 수도 그리고 크게 만들 수도 있기 때문에, 만약 수온 자료에 랜덤 오차가 있다고 하하더라도 추정된 염분 자료의 오차에 미치는 영향은 미미하다고 사료된다. 반면에 수온 자료의 편향 오차는 일반적으로 무시할 만큼 작다고 가정할 수 있으며, 현재 가용한 자료로는 평가가 불가능하므로 본 연구에서는 고려하지 않았다.

4. 국립수산과학원 정선 관측 염분 자료 품질 평가

4.1 자연 변동성 기반 평가

NIFS 정선 관측 염분 자료의 정량적 품질 평가에 앞서서 동해 남서부 해역에서의 T-S 다이어그램 기반의 물성 분포를 살펴보았다. Fig. 2는 CREAMS 관측 프로그램에서 얻어진 자료와 한국 ARGO 프로그램에서 얻어진 자료들 중에 해당영역에

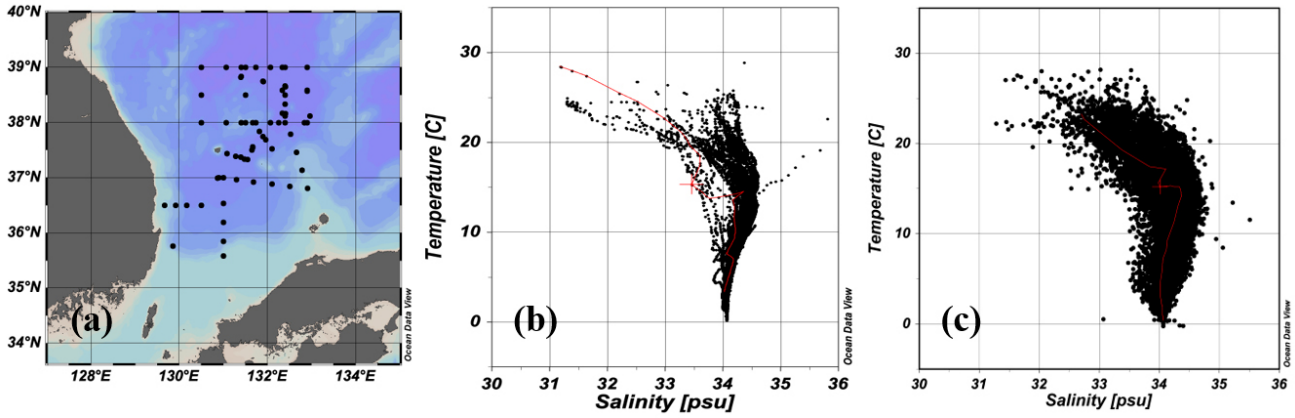

Fig. 2. (a) CREAMS hydrographic station map from July 1993 to March 1999 only in the south-western East Sea, (b) T-S diagram using the CREAMS data shown in (a), (c) T-S diagram using the ARGO float data from 2000 to 2014.

서 얻어진 수온/염분 자료만을 골라 도시한 T-S 다이어그램이다. CREAMS 자료와 ARGO 플로트 자료 모두 낮은 수온에서 염분 값의 산포 정도가 줄어들고 있음을 볼 수 있다. CREAMS 자료의 경우 해당 해역 전반에서 충분히 많은 자료가 수집되었다고 보기 어려운 점이 있기 때문에 통계적 특성을 이야기하기 쉽지 않으나 ARGO 자료의 경우에는 Fig. 1(c)에서 보여준 분포와 같이 NIFS 관측 해역 전체에 걸쳐서 수집되었음을 알 수 있고, 연도별로 분포에서도 자료가 많은 경우 깊은 수심을 같은 해역에 비교적 넓게 퍼져 있음을 확인하였다. CREAMS 선박 관측의 경우, 반복하여 관측하는 정점이 정해져 있는 반면에 ARGO 플로트는 수직적으로 오가면서 관측을 수행하므로 특정 해류 구조에 속박되지 않기 때문에 통계적 특성을 보기에 용이한 자료를 생산하는 특징이 있다.

Fig. 3은 NIFS 정선 관측 자료를 10년 단위로 끊어서 T-S 다이어그램을 도시한 것인데, Fig. 2의 두 다이어그램과 비교했을 때 낮은 수온 부분에서 염분 산포 정도의 극명한 차이를 보임을 알 수 있다. 과거에 얻어진 자료일수록 낮은 수온 부근에서 염분 자료가 넓게 퍼지는 경향이 두드러지게 나타남을 볼 수 있으나, T-S 다이어그램 전체적인 형태나 모양은 연대별로 비교적 유사함을 알 수 있다. 이것은 대부분의 과거 자료가 랜덤 오차가 큰 것이 아니라 염분 프로파일 전체가 편향되는 오차가 지배적으로 나타나고 있다는 것은 보여주는 결과라고 할 수 있다.

Park and Kim(2007)에 따르면 동해 서남부 해역 내에서 심층 염분의 시공간 변동성이 매우 작다고 한다. 0.4°C 등수온면에서의 염분의 시공간 변동성은 0.004 g/kg로, ARGO 염분 센서의 정확도인 0.003 g/kg를 고려하여 자연적 변동성만 산출하였을 시에 거의 0.003 g/kg에 근접할 정도로 변동성이 작다. 동해 심층 염분의 시공간 변동성이 매우 작기 때문에 이러한 특성을 활용해서 T-S 구조상에서 NIFS 정선 관측 자료의 산포 정도를 분석함으로써 과거 염분 자료 오차를 간접적으로 산출할 수 있다. 앞서 지적한 바와 같이 주로 프로파일 자체의 편향이 일어나 오차가 커지는 문제가 지배적이라고 판단되기 때문에 해당 분석 결과는 전체 수층으로 확대하여 편향 오차 입장에서 정량화하는데 활용할 수 있다고 사료된다.

Fig. 4(a)는 연도별로 얻어진 NIFS 정선 관측 자료로부터 1°C 등수온면에서의 염분 값이 시공간적으로 얼마나 변화하는지 표준편차로 도시한 것이다. 60년대와 70년대 염분 값의 편차는 0.1~0.2 g/kg에 달할 만큼 염분 값 편차가 해마다 크게 변동하는 특징이 있으며, 1981년부터 1990년대 중반까지는 0.05 g/kg 정도로 낮아지고 비교적 오차가 안정되어 나타나다가 1990년대 중반부터 2000년대 초반까지 0.01 g/kg 남짓 정도로 다시 한번 크게 낮아지고 2000년에 초반 이후부터 더욱 변동이 작아진 것을 볼 수 있다. 이러한 염분의 변동은 품질이 검증된 ARGO 플로트 자료로부터 얻어진 염분 값의 표준 편차 (Fig. 4(b))와 비교해보면 그 차이를 확연히 알 수 있다.

Fig. 4(b)에서는 지연모드 품질 개선을 수행한 연도별 ARGO 플로트 자료로부터 얻은 1°C 등수온면에서 염분 값의 편차를 Fig. 4(a)와 동일한 y축 상에서 도시한 것으로, 앞서 제시한 NIFS 관측 영역에 해당하는 자료만을 대상으로 계산하였다. Fig. 4(a)에 보이는 NIFS 정선 관측 자료의 연변동과 비교해 볼 때, Fig. 4(b)에서 나타난 염분 편차 값은 2001년부터 2015년

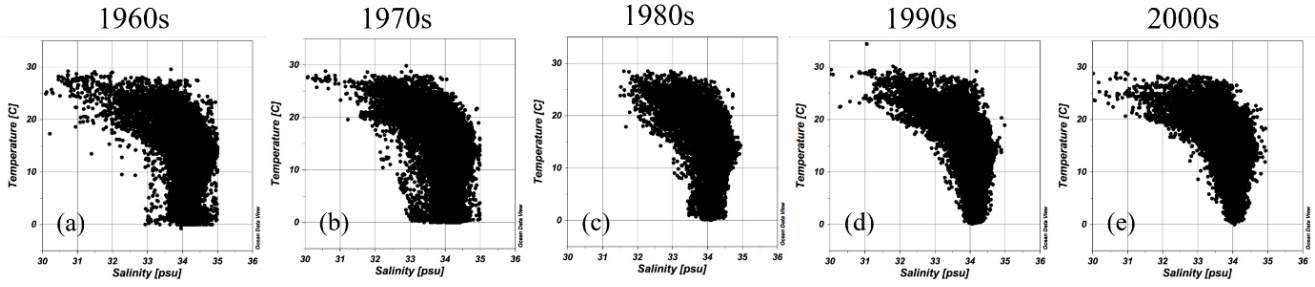

Fig. 3. T-S diagrams of the NIFS data in the East Sea within (a) 1961 ~1970, (b) 1971~1980, (c) 1981~1990, (d) 1991~2000, and (e) 2001~2010.

까지 거의 차이가 없는 것을 볼 수 있다. 따라서 해당 관측 영역에서 염분의 자연적 변동이 시간에 따라서 거의 변화가 없는 정상성 가정이 유효하다는 것을 보여준다. 16년간 염분의 자연 변동성이 시간에 따라 거의 일정하게 나타났기 때문에, 과거에도 정상성 가정을 적용할 수 있을 것으로 사료되며, 정상성 가정을 바탕으로 과거 NIFS 염분 자료의 오차를 정량화하는 방법을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

ARGO 자료로부터 얻은 자연적 변동성이 해당 해역에서 약 0.004 g/kg 인데, NIFS 정선 관측 자료 전체 기간 동안 나타나는 대부분의 편차 값은 이 자연적 변동성 값보다 5배~50배 더 큼을 알 수 있다. 앞서 설명한 바와 같이 Fig. 5(a)에 나타난 염분

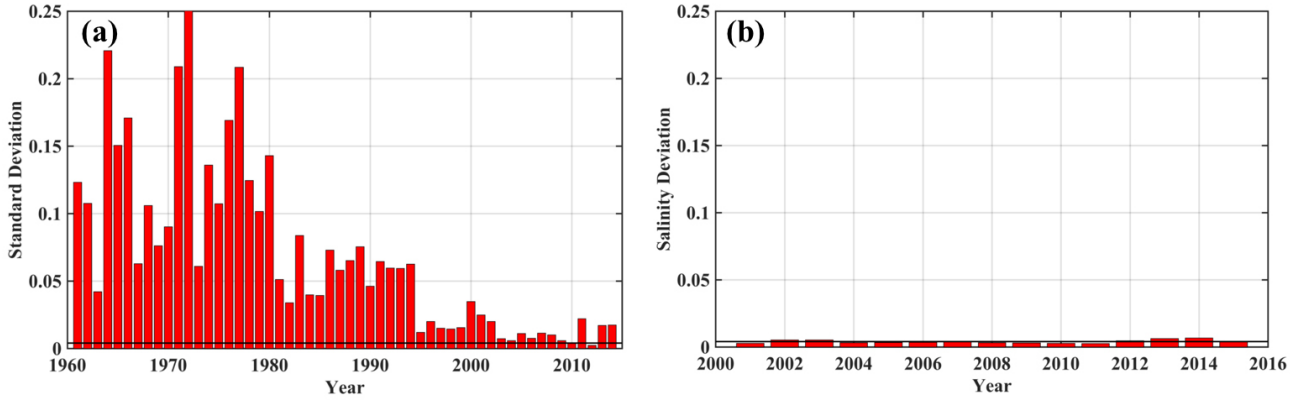

Fig. 4. Yearly standard deviation of salinity on 1°C isothermal surface obtained from (a) NIFS data and (b) delayed-mode quality controlled ARGO float data.

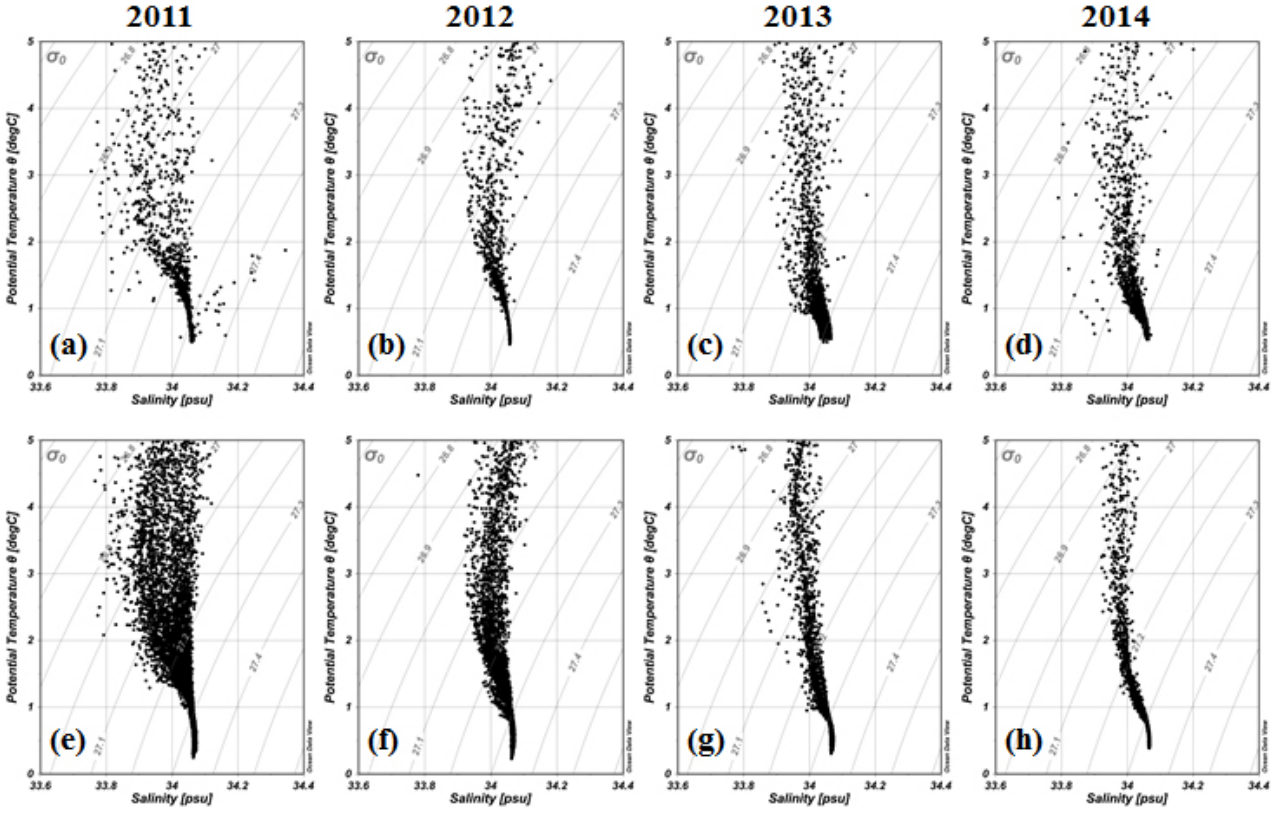

Fig. 5. T-S diagrams obtained from NIFS data (a-d) and from ARGO float data (e-h) in (a,e) 2011, (b,f) 2012, (c,g) 2013, and (d,h) 2014.

편차는 NIFS 정선 관측 자료가 가지고 있는 오차와 자연적인 변동성이 같이 포함되어 있기 때문에 식 (2)에 의거하여 NIFS의 염분 오차를 정량화할 수 있다. 자연적 변동성이 60년대 이후부터 동일하게 적용하였다고 가정할 때 NIFS 염분 자료 오차를 정량화할 수 있다. NIFS 염분 자료 특성이 Fig. 4(a)에 나타난 패턴을 중심으로 시기를 크게 4단계로 나눠서 볼 수 있는데, 첫 번째는 1961~1980년, 두 번째는 1981~1994년, 세 번째는 1995년~2002년, 마지막은 2003년~2014년으로 정의하였다. 각 단계별로 식 (2)에 의거하여 산출한 NIFS 염분 자료의 오차는 Table 1과 같이 정리될 수 있었다.

NIFS 염분 자료의 오차가 이렇게 급격하게 변화해온 것은 일차적으로 염분 자료 취득 방식의 변화와 관련이 있다고 볼 수 있다. 1990년대 중반 이전에는 채수하여 적정 방식으로 염분을 측정하였으나, 그 이후부터는 CTD 관측 장비가 도입되면서 사람의 주관이 들어가는 여지가 많이 줄어들었다. 이로 인해 1990년대 중반을 기점으로 하여 비약적으로 염분 자료의 정확도가 향상된 것으로 볼 수 있다. 1980년초를 기점으로 그 이전과 이후 90년대 중반 사이의 염분 자료 품질에도 뚜렷한 차이가 보인다. 이것은 동일한 적정 방식을 활용했음에도 실제 자료를 처리하는 인력 구조에 차이가 있었기 때문이라고 한다. 1980년대 이전에는 해양 분야 교육을 받지 않은 인력이 채수 샘플을 처리하여 염분 자료를 생산한 반면, 이후에는 해양학과 대학원 출신 인력들이 자료 생산을 담당함으로써 자료 품질도 평균적으로 높아지고 일관성도 좋아졌다. 1990년대 중반에 들어 CTD 센서 장비가 도입되어 관측에 활용되면서 자료의 품질이 크게 향상되었으나, 2000년대 초반에 일시적으로 다시 자료의 품질이 나빠지는 경향을 보이는데, 이 시기에 CTD 관측을 담당하는 인력의 전문성 문제가 있었다고 한다. 2000년대 중반에 들어서면서 고품질 자료를 생산하는 SBE-911 센서가 도입되고 정기적인 교정 과정을 수행함에 따라 자료의 품질은 2010년까지 더욱 정확해지는 경향을 보인다.

그러나, 2010년까지 유지되던 염분 정확성은 2011년 이후부터 다시 급격하게 나빠진 양상을 볼 수가 있는데, 이 부분을 좀 더 자세하게 이해하기 위해서 Fig. 5를 도시하였다. Fig. 5는 2011부터 2014년까지 연도별로 얻어진 자료의 T-S 다이어그램을 표시한 것으로 Fig. 5(a)~5(d)까지는 NIFS 정선 관측 자료 이며, Fig. 5(e)~5(h)까지는 ARGO 플로트에서 얻어진 자료이다. 2011년도부터 2014년도까지 전체적인 T-S 다이어그램 패턴은 NIFS 정선 관측 자료와 ARGO 자료가 매우 유사하다. 2011년에는 1.5~5°C 사이의 수온에서 33.9~34.1 g/kg에 해당하는 수형(water type)이 넓게 퍼져서 나타나는 패턴이 NIFS와 ARGO 자료에서 둘 다 유사하게 나타나는데, 이는 염도가 낮은 동해중층수가 자주 출현했다는 것을 의미한다. 2012년에는 수형이 비교적 좁은 곡선 안에서 나타나며 2~3°C 부근에 염분최소층이 보이는 특성의 T-S 패턴을 보여준다. 2013년도에는 1°C 이상에서 염분최소층을 포함하는 곡선 형태로 나타나는 굴곡이 약화되고, 2014년도에는 상대적으로 낮은 수온에서 염분최소층이 나타나는 패턴이 각각 NIFS 정선 관측 자료와 ARGO 자료에서 유사하게 나타난다.

반면에, NIFS자료를 자세히 살펴보면 각각 2011년과 2014년에는 전체적인 수형 산포 범위와 다른 변칙 자료들이 종종 나타남을 알 수 있다. 왜 이러한 자료가 나타났는지에 대한 이유는 명확하지 않지만, 가능성 높은 원인은 2013년도와 2014년도 자료로 판단해볼 수 있다. 2013년도에는 염분 센서 자체가 2월부터 10월까지 점진적으로 저염 방향으로 편향되는 것을 확인할 수 있었으며, 2014년도에는 107 라인 연안 부근(동해 정선 관측이 시작되는 시점)에서 편향이 크게 발생했다가 없어지는

Table 1. NIFS salinity error in accordance with the observation period

Period	Error
1961~1980	0.160 g/kg
1981~1994	0.060 g/kg
1995~2002	0.020 g/kg
2003~2014	0.010 g/kg

모습도 확인이 되었다. 이것으로 2011년 이후에 염분 자료의 정확도가 낮아진 이유가 전기 전도도 센서 관리의 소홀로 발생했을 가능성이 높다고 볼 수 있다. 하지만, 2012년에는 매우 정확하게 자료가 얻어진 것을 볼 수 있고 이 시기는 ARGO 자료의 정확도보다 더 작은 오차인 0.001 g/kg 이하를 기록하여 SBE-911 센서 본연의 정확도에 가깝게 정확한 자료가 얻어졌음이 확인되었다.

4.2 직접 비교 평가

NIFS 염분 자료의 정확도를 측정하기 위해 2000년부터 2014년까지 ARGO 자료가 충분히 확보된 시기를 중심으로 NIFS 정선 관측 자료와 ARGO 자료를 직접 비교 평가하였다. 이 직접 비교를 통해 자연변동성 기반으로 이루어진 평가를 통해 얻어진 NIFS 염분 자료의 오차를 재확인하고자 한다. NIFS와 ARGO 염분 자료의 직접 비교는 위와 동일하게 1°C 등수온면에서 진행하며 특정 시공간 윈도우를 적용하여 비슷한 시기와 지역에서 얻어진 NIFS와 ARGO 두 자료를 찾아 두 개의 프로파일에서 얻어진 염분 값의 차이를 구하여 진행하였다.

Fig. 6(a)는 NIFS 정선 관측 자료와 ARGO 자료 비교를 위해서 동해의 비상관 시간 및 공간 거리인 10일, 20 km 시공간 윈도우를 적용하여(Park and Kim, 2013; Park and Park, 2015) 찾은 페어 샘플의 위치를 도시한 것이다. Fig. 6(b)는 Match-up된 페어 샘플의 수를 연도별로 도시한 것이고, 그 염분 값의 차이($S_{NIFS} - S_{ARGO}$)를 Fig. 6(c)와 같이 히스토그램으로 나타내었다. 전체적으로 ARGO 자료와 NIFS 정선 관측 자료의 염분 편차 RMS (Root-Mean-Square) error가 약 0.010 g/kg으로 나타나는 것을 확인할 수 있었으며, 평균 편차는 0.001 g/kg이내로 거의 0에 가까웠다.

$$e_{NIFS} \cong \sqrt{(\sigma_{\Delta s}{}^2 - e_{ARGO}{}^2)} \tag{3}$$

e_{NIFS}는 NIFS 염분 자료의 오차이며 $\sigma_{\Delta s}$는 편차의 표준편차, e_{ARGO}는 ARGO 염분 자료의 오차를 나타낸다. 해당 시공간 윈도우 내의 염분 자연변동성은 없다는 가정 하에 두 염분 자료 사이의 차이가 갖는 분산은 순전히 ARGO 염분 자료의 오차와 NIFS 염분 자료의 오차에 의해 결정된다(식 (3)). 이로부터 산출한 e_{NIFS}는 0.0095 g/kg로 2000년대 이후부터는 NIFS 염분 자료의 정확도가 높아졌다고 정량적으로 이야기할 수 있고, Table 1에서 계산한 2000년대 NIFS 염분 자료의 오차 수준과 일관된 결과를 얻었음을 확인할 수 있다.

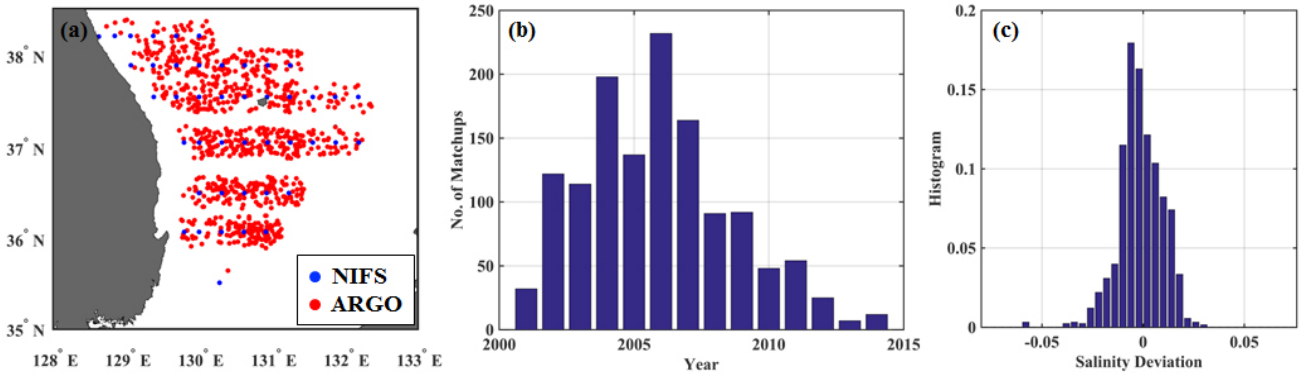

Fig. 6. (a) Match-up locations for NIFS data in blue dots and ARGO data in red ones, (b) temporal distribution of match-ups, and (c) histogram of salinity deviation (S_{NIFS}-S_{ARGO}) on 1°C isothermal surfaces between NIFS and ARGO data.

하지만, 염분 표준편차의 히스토그램을 도시한 Fig. 6(c)를 살펴보면 0.04 g/kg 이상의 편차가 나타나는 경우가 존재하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4(b) 자료에서 나타난 변동성에 비추어 보더라도 해당 변칙적 자료는 자연적인 물성 변동으로 보기 어려울 정도로 편차가 큰 것이라고 판단된다. 또한 이러한 오류는 Fig. 5에서 나타난 일부 급진적인 혹은 점진적인 편향의 결과로 나타나는 것으로 판단되므로, 이러한 편향을 품질관리 단계에서 보정하거나 센서 관리의 체계화를 통해 문제를 최소화함으로써 NIFS 염분 자료의 정확도를 크게 향상시킬 수 있다는 것을 반증하는 결과라고 할 수 있다. 정리하면, 2000년 이후 수집된 자료의 경우 평균적인 오차는 크게 향상되었으나, 여전히 많은 변칙적 자료들이 존재한다. 0.01 g/kg 이하의 영년 변동이나 수십년 변동을 보기 위해서는 적어도 0.003 g/kg 정도의 정확도가 요구되므로 자료의 정확도를 높이기 위해 NIFS 관측 방식과 자료 처리 방법의 수준을 높이기 위한 노력이 필요하다고 사료된다.

5. 토의 및 결론

5.1 NIFS 정선 관측 자료 품질 평가의 중요성

NIFS 정선 관측 자료는 1960년도부터 현재까지 약 60년 이상 자료가 공개되어 있고 공개되어 있지 않은 자료까지 합친다면 거의 100년에 가까운 자료가 축적되어 있다. 오랜 기간 동안 비슷한 위치에서 관측한 자료로 동해의 장기적인 변동을 이해하는데 큰 역할을 할 것으로 생각되는 자료이지만, 많은 연구자들이 NIFS 정선 관측 자료의 품질을 신뢰하지 못하여 실제 장기 변동성 연구에 활용되는 경우는 안타깝게도 드물었다. 장기 기후 변동성을 분석하는데 있어 NIFS 염분 자료를 활용하기 위해서는 무엇보다 먼저 정량적인 관점에서 자료 품질을 알고 있어야 한다. 과거 자료는 관측 방식의 문제로 최근 센서 기반으로 얻어진 자료보다 오차가 크다는 것은 누구나 알고 있는 사실이지만, 오차 수준에 대한 정량적 분석 결과가 있다면, 오차보다 더 크게 나타나는 변동성은 충분히 분석할 수 있기 때문에 과거 자료의 오차 수준의 정량화는 중요한 과정이라고 할 수 있다.

자료의 품질에 대해 분석하는 방법은 독립적인 다른 자료와의 비교를 통한 절대적 평가 방법이 가장 직접적이며 정확하지만, 과거 자료를 직접적으로 비교하여 평가할 수 있는 독립적인 자료가 없기 때문에 해당 방법은 적용이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 동해 물성의 시공간 변동성이 매우 작다는 해역의 특성을 활용하여 과거 NIFS 염분 자료의 품질 분석을 진행하였다. NIFS 염분 자료의 오차는 1961년부터 2014년까지 단계적으로 변화해 왔으며, 1960~1970년대에는 0.160 g/kg 오차에서, 1980년대에는 0.060 g/kg, 1990년대에는 0.020 g/kg, 2000년대에는 0.010 g/kg 오차로 점진적으로 개선되었다. 이러한 오차 개선은 일차적으로 염분을 측정하는 방식의 변화이지만, 전문적이고 체계적인 자료 처리를 수행했는지에 따라 2배 이상의 정확도 개선이 이루어졌다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 2010년 이후로 얻어진 최근 NIFS 정선 관측 자료를 분석함으로써 적합한 품질 관리 과정이 도입되어 센서의 편향을 평가하고 보정할 수 있다면 2000년대의 평균적인 오차 수준보다 훨씬 고품질의 자료가 생산될 수 있음도 확인할 수 있었다.

본 연구에서 염분 자료의 품질을 평가하기 위한 기준은 1°C 등수온면으로 해당 등수온면은 동해 남서부 해역에서 수행되는 NIFS 정선 관측 자료 영역에서 동해중층수에 해당하는 수층대이다. 동해중층수는 심층수에 비해 순환이 빠르기 때문에 기후변화에 따른 해양의 변화를 연구하는데 매우 중요한 수괴이며, 해양의 자오선 수직 순환 체계에서 심층수가 형성되어 가라앉고 난 뒤에 다시 표층으로 올라오는 과정에서 상호작용을 하게 되는 수괴이므로 기후변화에 반응하는 동해의 자오선 수직 순환을 이해하는데 핵심적인 역할을 하는 수괴이기도 하다. ARGO 플로트 자료는 최근 10여년 정도 자료가 축적되어 있고 동해중층수에 해당하는 수층을 관측하지만, 이 자료만으로 장기적인 변동성을 보기에는 자료의 길이가 부족하고 또한 관측 위치가 항상 달라지기 때문에 변동성 분석에 어려움이 있다. 따라서 동해중층수의 장기변동성을 이해하는데 있어서 NIFS

정선 관측 자료가 가지는 중요성이 크다고 할 수 있다.

5.2 NIFS 정선 관측 자료 품질 개선을 위한 제언

현재 NIFS 정선 관측 자료는 표준 수심에서만 수온 및 염분 자료를 제공하고 있다. 따라서 특정 등수온면에서의 염분 값을 산출하기 위해서는 내삽 과정이 요구된다. 본 연구에서 산출한 염분의 오차에는 내삽 과정에서 생기는 오차까지 포함되어 있다고 할 수 있지만 이 오차는 NIFS 정선 관측 자료가 가지고 있는 편향 오차에 비해서는 무시할 만큼 작다고 판단된다. 표준 수심에서만 자료가 존재한다는 문제점은 한 프로파일 자료 내에서 얻어진 각 샘플의 오차를 판별할 때 정확성이 낮아질 수 있다는 문제를 야기하지만, 편향 오차를 평가할 때는 특별히 문제가 되지 않는다. 본 연구에서는 편향 오차 중심으로 오차를 정량화하였고, 프로파일 내의 각 샘플 중 오차가 큰 샘플은 스파이크 시험 또는 밀도 역전 시험 등으로 판별하여 제거할 수 있다고 언급하였다. 이것은 한 프로파일에서 나타나는 염분 수직 구조의 경향성과 역학적 평형 관점에서 문제가 발생한 샘플을 찾을 수 있다는 원칙이지만, 실제로 표준 수심 자료만으로는 수직 구조의 경향성에서 특정 샘플의 문제를 파악하기에는 불충분하다. 그렇기 때문에 NIFS 정선 관측 자료의 품질을 개선하고 사용자의 활용성을 높이기 위해서 높은 수직 해상도의 자료를 제공하는 것이 매우 중요하다.

또한, NIFS 정선 관측 자료의 품질 개선을 위해 시급하게 개선되어야 하는 부분은 염분 자료의 편향을 보다 정확하게 평가하고 보정하기 위해 적어도 800~1000 m 까지 관측을 수행하는 것이 필요하다는 것이다. 동해중층수의 하부 수심이 500~600 m 까지 내려가는 경우도 있기 때문에, 시공간적으로 보다 안정적인 동해중앙수에 해당하는 수심에서의 관측 자료가 편향 평가의 정확성을 높일 수 있기 때문이다. 동해중층수는 상층 대마난류수의 분포에 의해서도 비교적 큰 영향을 받기 때문에 NIFS 관측과 같이 공간적으로 조밀하게 얻어지는 자료의 효용성이 높다. 반대로 동해중앙수나 심층수 등은 높은 해상도로 측정할 필요성이 낮기 때문에, 가능하다면 몇 개의 정점은 전체 수심 관측을 수행하고 대부분의 정점은 800 m까지는 관측을 수행하는 것이 최소한의 비용으로 높은 자료 품질을 확보하는 방법이라고 사료된다. 또한 두-세 곳의 정점에서 심층 해수 채수를 통해 절대 염분 값을 측정하여 보정한다면, 현재보다 훨씬 물성 자료의 정확도를 향상시킬 수 있으며, 동해 수괴의 장기 변동을 연구하는데 있어서 필수적인 고품질 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

Fig. 5를 통해 언급했듯이 센서 관리와 품질 관리 과정의 체계화와 전문화는 NIFS 정선 관측 자료 품질 개선을 위해서 반드시 필요한 항목이다. 전문적인 교육을 받는 인력이 정선 관측을 담당하거나 감독하여 관측 시기에 발생할 수 있는 문제를 최소화하는 과정이 중요하다. 또한 체계화된 품질 관리 과정을 수립하여 자료가 얻어진 후, 오류 자료를 검수 및 보정하고 기준에 따라 자료 품질 평가 결과도 같이 제공하는 것이 필요하다. 한국해양자료센터에서는 최근 들어 자료의 품질을 표시하는 Quality Flag 체계를 도입하여 제시하고 있으며, 이것은 매우 바람직한 방향이라고 사료된다(Lee *et al*., 2010). 그러나, 본 연구 결과에서 보여준 최근 염분 자료의 품질을 보았을 때, 이러한 Quality Flag 체계가 보다 전문화되고 고도화된 자료 품질 관리 과정과 맞물릴 수 있도록 시스템을 갖추는 것이 시급한 문제이다.

마지막으로 거의 100년 가까이 축적되어 있는 정선 관측 자료는 그 자체로 매우 소중하고 중요한 자료이므로 면밀한 품질 관리와 보정 과정을 통해 과거 자료 또한 보다 높은 품질의 자료로 재생산하여 제공하는 것이 필요할 것으로 사료된다. 기본적으로 적정 방법으로 산출한 염분의 오차는 약 0.02 g/kg 으로 알려져 있으나(Knudsen, 1959), 과거 NIFS 정선 관측 염분 오차는 이것의 10배에 가까운 높은 오차 수준을 가지고 있기 때문에, 가치가 높은 장기간의 관측 자료임에도 불구하고 활용성이 저조하다는 문제가 있다. 따라서, 보다 많은 연구자들이 활용할 수 있도록 편향을 보정하고 오류를 개선하여 서비스하는 노력이 필요하다.

사 사

본 연구를 정리하는데 도움을 주신 국립수산과학원의 황재동 박사님과 이준수 박사님께 감사의 말씀을 드리고 싶고, 논문 마무리 작업을 도와준 김봉준 학생에게도 감사의 말을 전합니다. 이 논문은 2020년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원(수중글라이더 핵심부품장비 기술개발 및 운용센터 구축 사업, 20200482)과 2018년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2017R1A2B2006445), 기상청/국립기상과학원 주요 사업인 '관측자료를 활용한 해양예측기술 개선 연구'의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

참고문헌(References)

Akima, H., 1972. Algorithm 433: interpolation and smooth curve fitting based on local procedures [E2]. Comm. ACM, **15**(10): 914-918.

Kang, S.K., J.Y. Cherniawsky, M.G.G. Foreman, H.S. Min, C.H. Kim and H.W. Kang, 2005. Patterns of recent sea level rise in the East/Japan Sea from satellite altimetry and in situ data. J. Geophys. Res., **110**: C07002, doi:10.1029/2004JC002565.

Kim, K., K.R. Kim, Y.G. Kim, Y.K. Cho, D.J. Kang, M. Takematsu and Y. Volkov, 2004. Water masses and decadal variability in the East Sea (Sea of Japan). Prog. Oceanogr., **61**(2-4): 157-174.

Knudsen, M., 1959. Hydrographical Tables. Tutein & Koch, Copenhagen, Denmark, 63 pp.

Lee, J.S., Y.S. Suh, W.J. Go, J.D. Hwang, S.H. Youn, I.S. Han, J.Y. Yang, J.Y. Song, M.H. Park and K.J. Lee, 2010. Improvement Plan of NFRDI Serial Oceanographic Observation (NSO) System for Operational Oceanographic System. J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf., **16**(3): 249-258.

Lichten, W., 1999. Data and error analysis. Prentice Hall, New Jersey, USA, 192 pp.

Min, D.H. and M.J. Warner, 2005. Basin-wide circulation and ventilation study in the East Sea (Sea of Japan) using chlorofluorocarbon tracers. Deep Sea Res. II, **52**(11-13): 1580-1616.

Owens, W.B. and A.P. Wong, 2009. An improved calibration method for the drift of the conductivity sensor on autonomous CTD profiling floats by θ-S climatology. Deep Sea Res. I, **56**(3): 450-457.

Park, J.J. and J.S. Park, 2015. Deployment Strategy of ARGO Floats in the East Sea. Ocean Polar Res., **37**(3): 179-188.

Park, J.J. and K. Kim, 2007. Evaluation of calibrated salinity from profiling floats with high resolution conductivity-temperature-depth data in the East/Japan Sea. J. Geophys. Res., **112**: C05049, doi:10.1029/2006JC003869.

Park, J.J. and K. Kim, 2013. Deep currents obtained from Argo float trajectories in the Japan/East Sea. Deep Sea Res. II, **85**: 169-181.

Talley, L.D., P. Tishchenko, V. Luchin, A. Nedashkovskiy, S. Sagalaev, D.J. Kang, M. Warner and D.H. Min, 2004. Atlas of Japan (East) Sea hydrographic properties in summer, 1999. Prog. Oceanogr., **61**(2-4): 277-348.